

基于激光雷达对 WRF 模式模拟边界层高度的评估

项衍^{1,2*}, 张天舒², 刘建国², 吕立慧^{1,2}

¹安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601;

²中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 2015 年 12 月份重污染频发的北京市先后启动两次大气重污染红色预警。本研究根据中科院大气物理研究所铁塔分部激光雷达的立体探测数据, 采用梯度法反演北京市区大气边界层高度, 并对中尺度数值模式 WRF 的模拟结果进行评估。结果表明, 虽然两种方法的结果具有较好的一致性, 但是极值并没有很好地吻合。激光雷达反演边界层高度日变化与 WRF 模拟结果的相关性达到 0.76, 均方根误差为 163 m, 平均偏差为 -61 m。同时发现在清洁天气下, WRF 模拟的准确性要高于污染天气下的模拟结果。此外地面观测的 PM_{2.5} 质量浓度与激光雷达反演的大气边界层高度相关性达到 -0.85。

关键词 传感器; 边界层高度; 激光雷达; 数值模拟; 红色预警

中图分类号 P412

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0110002

Evaluation of Boundary Layer Height Simulated by WRF Mode Based on Lidar

Xiang Yan^{1,2*}, Zhang Tianshu², Liu Jianguo², Lü Lihui^{1,2}

¹Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China;

²Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Severe haze occurred in Beijing frequently during December 2015, which had launched two red alerts for atmospheric heavy pollution. In this paper, according to the lidar stereo data at the tower of the institute of atmospheric physics of the Chinese academy of sciences, the atmospheric boundary layer height of Beijing city is retrieved by gradient method, and the simulation results of the mesoscale numerical WRF model are evaluated. The results show that the two methods have good consistency, but the extreme values are not very consistent. The correlation between lidar inversion of daily variation of boundary layer height and WRF simulation results reaches 0.76, the root mean square error is 163 m, and the average deviation is -61 m. Meanwhile, the accuracy of WRF simulation in clean weather is higher than that in polluted weather. In addition, the correlation between the observed PM_{2.5} mass concentration and the ABLH of lidar inversion is -0.85.

Key words sensors; boundary layer height; lidar; numerical simulation; red alert

OCIS codes 280.3640; 010.1290; 080.2720; 280.1350

1 引 言

大气边界层(ABL)是人类活动和各项生态环境过程发生的主要大气层区域^[1]。与上层自由大气交界处存在的逆温层所对应高度被定义为大气边界层高度(ABLH)^[2]。ABL 作为整层大气中最靠近下垫面的一层,除了受大气层结影响外,还受到下垫

面的影响,在重霾天气的形成过程中发挥重要作用。因此,探测 ABL 的结构特征十分重要,目前无法直接测量 ABLH,只能依赖于对其他资料的反演。常用的 ABLH 求解方法有位温法、梯度法、Richardson 数法、曲线拟合法、小波变换法及干绝热法等^[3]。

激光雷达作为一种先进的探测手段,将其观测

收稿日期: 2018-06-21; 修回日期: 2018-08-30; 录用日期: 2018-09-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0200401, 2017YFC0213002)、大气重污染成因与治理攻关项目(DDGG0102)、国家重点基础研究发展规划项目(2014CB447900)、国家自然科学基金项目(41605020)

* E-mail: yxiang@ahu.edu.cn

数据用于反演 ABLH 早已被认可。张婉春等^[4]采用梯度法利用激光雷达回波信号反演北京 2013 年 1 月重霾期间的 ABLH,反演结果与探空数据具有很好的一致性,平均差异仅为 86 m,同时发现严重污染时 ABLH 低于 500 m,日平均高度约为 424 m。吕立慧等^[5]利用 2014 年 11 月京津冀地区 10 台激光雷达数据,采用梯度法获取的 ABLH 结果和美国全球资料数据同化模式模拟的边界层高度相关性达到 0.82,表明梯度法是稳定可靠的,同时发现京津冀地区 ABLH 在 300~900 m 之间,并且东南方向较高。王琳等^[6]评估了激光雷达数据反演边界层高度的 4 种方法,发现这 4 种方法各有优缺点和适用范围,其中梯度法、标准偏差法、小波协方差变换法比较相近,准确性高但不稳定,而曲线拟合法的稳定性好,但结构精度不高。

此外也有研究表明 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式可以在一定程度上相对准确地模拟出 ABLH,陈炯等^[7]利用 WRF 模式对北京地区夏季 ABLH 日变化进行了模拟分析,认为使用高分辨率的模拟基本上能够反映出 ABLH 的日变化特征。赵世强等^[8]利用激光雷达结合 WRF 数值模式估算出兰州远郊榆中地区夏季 ABLH,指出两种方法反演的 ABLH 具有较好的一致性,但选取的边界层方案不能同时兼顾热对流边界层和动力作用边界层的模拟。何心河等^[9]的模拟研究指出 WRF 模式在浓度低时模拟结果较好,而对浓度快速大幅上升和极值的模拟能力还不够。王丽霞等^[10]评估了 WRF 模式中 YSU (Yonsei University Scheme)、MYJ (Mellor-Yamada-Janjic Scheme) 和 ACM2 (Asymmetric Convective Model, Vision 2) 三种不同的边界层方案模拟结果,指出三种不同的边界层方案均能够模拟出冬季边界层高度日变化的基本特征,其

中,YSU、MYJ 和 ACM2 模拟结果与位温廓线法所得结果对比的平均绝对误差分别为 79.56%,124.64%和 85.03%,均方根误差分别为 110.17,200.5,122.25 m,消光系数分别为 0.85、0.76 和 0.91。

2015 年 12 月北京市先后启动两次重污染红色预警,这是《北京市空气重污染应急预案》自 2013 年通过以来北京及全国初次启动大气重污染红色预警^[11]。本文针对 12 月份重污染期间北京市的 ABLH 进行研究,利用激光雷达反演评估 WRF 模拟结果,同时分析 ABLH 与颗粒物质量浓度之间的关系。

2 研究方法

2.1 激光雷达反演 ABLH

激光雷达是探测大气气溶胶物理及光学特性时空分布的有效手段,被广泛应用于大气气溶胶、大气成分和云的研究领域^[12-14]。激光雷达可长时间连续不断地自动进行探测工作,其探测数据具有高时空分辨率的特征,因此,可以更好地实时、连续测量 ABL 结构的时空分布^[15-18]。

2.1.1 激光雷达系统

激光雷达系统总体结构由三部分组成:激光发射单元、接收单元、数据采集和控制单元。激光发射单元由激光器和发射光学单元两部分组成^[19]。接收单元是激光雷达系统的核心部分,需要根据探测目标的不同来设计不同类型的接收望远镜和后继光学单元,以降低探测盲区,提高系统信噪比,减少对大气多次散射光子的接收。数据采集和控制单元是决定激光雷达数据质量的关键部分之一,采集电子学系统的响应速度、带宽、动态范围及信噪比直接决定雷达系统时空分辨能力和对弱信号的解析能力,表 1 为该激光雷达系统的主要参数。

表 1 激光雷达系统主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of the lidar system

Lidar system	Parameter	Specification
Transmitter	Laser source	Nd:YAG
	Wavelength /nm	355
	Pulse energy /mJ	30
	Pulse repetition frequency /Hz	10-30
	Beam divergence /mrad	<3
Receiver	Telescope type	Cassegrain
	Field of view /mrad	1-2
	Detector	Program map table
Data acquisition and processing	Time resolution /min	3-30
	Spatial resolution /m	7.5

2.1.2 梯度法

ABL与上部自由大气层之间的覆盖逆温作用使边界层内富含大量的气溶胶粒子,而自由大气层中只含有少量的气溶胶粒子,使边界层和自由大气层中的气溶胶粒子质量浓度发生明显变化,根据气溶胶质量浓度在空间垂直分布的梯度变化规律来确定ABLH。而激光雷达探测到的后向散射回波信号与气溶胶粒子质量浓度呈正相关,因此,可以用激光雷达后向散射回波信号的梯度变化来反演ABLH^[20]。

对激光雷达接收到的米散射后向回波信号进行处理得到的激光雷达距离平方校正回波信号(PRR)为

$$P(R)R^2 = CY(R)\beta(R, \lambda)T(R, \lambda), \quad (1)$$

式中, R 为探测高度, C 为激光雷达的系统因子, $Y(R)$ 为与探测高度 R 相关的几何因子, λ 为激光波长, $\beta(R, \lambda)$ 为探测高度 R 处的大气后向散射系数, $T(R, \lambda)$ 为大气透过率。PRR 廓线强度对应于相应高度大气气溶胶质量浓度的大小, PRR 廓线梯度变化代表大气气溶胶质量浓度的变化, 这个梯度变化最大的位置对应 ABLH。

梯度法采用回波信号随高度衰减速率大小作为判断 ABLH 的依据, 定义 PRR 梯度为

$$D(R) = d[P(R)R^2]/dR, \quad (2)$$

反映 PRR 在不同高度 R 处的衰减变化情况。ABLH 对应于 PRR 衰减最快的位置, 也就是 $D(R)$ 取最大值时所对应的高度值^[21]。

在利用梯度法计算边界层高度之前, 需对激光雷达回波信号进行校正, 以保证准确反演边界层高度。首先, 选取 16~20 km 处回波信号进行背景噪声扣除; 其次, 将各层高度上的回波信号强度乘上距离的平方再进行距离平方校正; 然后, 采用基于最小二乘的卷积拟合算法的 Savitzky-Golay 滤波器对回波信号进行滑动窗口平滑降噪; 最后, 对底层大气回波信号进行几何重叠因子校正, 并将结果与高层大气回波信号进行拼接, 得到几何因子校正后的回波信号强度。

2.2 WRF 数值模式模拟 ABLH

WRF 数值模式是由 NCAR (National Center for Atmospheric Research) 及 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 联合相关大学和科研机构开发的新一代中尺度预报模式同化系统, 给理想化的动力学研究、全物理过程的天气预报、空气质量预报以及区域气候模拟提供了一个

公用的模式框架^[7, 22]。

2.2.1 模型设置

本研究所用的数值模式为 WRF3.7.1, 研究区域覆盖京津冀地区。模拟采用双向反馈的三重嵌套网格, 模拟中心点为 (36.228°N, 111.278°E), 水平方向采用 Lambert 投影, 水平分辨率分别为 36, 12, 4 km, 第一层网格数为 100×100, 第二层网格数为 103×103, 第三层网格数为 151×127。垂直层为 101 层, 为了更细致地描述边界层结果, 边界层内设置较高的分辨率, 2 km 以下设置了 34 层, 垂直层顶气压为 50 hPa。模拟时间段为 2015 年 11 月 20 日至 31 日(北京时间), 其中 11 月份的数据为预积分数据。模型所需的气象输入数据采用美国国家环境预测中心 (NCEP) 发布的 FNL (final operational global analysis) 再分析数据作为模式初始场, 网格分辨率为 1°×1°, 每 6 h 提供一次边界条件。表 2 为模拟所采用的物理参数化方案, 模式微物理过程选择 Lin 方案^[23], 长波辐射选择 RRTM (rapid radiative transfer model) 方案^[24], 短波辐射选择 RRTMG (rapid radiative transfer model for general circulation models) 方案^[24], 陆面过程选择 Noah 方案^[25], 边界层采用 YSU 方案^[26], 积云对流采用 Grell-Freitas 方案^[27], 地形数据采用美国 USGS 30s 的 LANDUSE 资料, 该资料有 24 种土地利用分类, 可为高分辨率数值模拟提供必要的数据基础。

表 2 物理参数化方案

Table 2 Physical parameterization schemes

Item	Content
Microphysics	Lin <i>et al.</i> scheme
Longwave radiation	RRTM scheme
Shortwave radiation	RRTMG shortwave
Land surface	Noah land surface model
Boundary layer scheme	YSU
Cumulus parameterization	Grell-Freitas ensemble scheme

2.2.2 理查森教法

理查森教法 (Richardson, 简称 Ri)^[28] 是从 WRF 模式中计算 ABLH 的标准方法, 总体理查森数的计算公式为

$$\alpha_{Ri_g}(h_i) = \frac{g(h_i - h_1)}{\theta_v(h_1)} \times \frac{\theta_v(h_i) - \theta_v(h_1)}{\sqrt{[u(h_i) - u(h_1)]^2 + [v(h_i) - v(h_1)]^2 + \beta u_*^2}}, \quad (3)$$

式中, α_{Ri_g} 为理查森数值, h_i 为模式输出的各层高

度, $\theta_v(h_i)$ 为模式各层的虚位温, $u(h_i)$ 、 $v(h_i)$ 分别为模式各层纬向风、经向风, g 为重力加速度, β 为系数, u_* 为摩擦系数。

理查森数法定义 ABLH 为从第一层开始, 理查森数值 α_{Ri_g} 首次大于给定临界理查森数 α_{Ri_c} 的高度。YSU 方案将 ABLH 定义为临界理查森数为零的高度, 也即定义为在逆温层通量最小的层所在高度^[29]。

3 结果与讨论

3.1 激光雷达回波信号时空分布与空气质量指数变化趋势

地面监测数据来自全国城市空气质量实时发布平台中北京市奥体中心环境监测站点(40.0031° N, 116.407° E)数据(含下文的PM2.5数据), 利用位于距离监测站点约 4 km 的北京市中国科学院大气物理研究所铁塔分部(39.9748°N, 116.370°E)的激光雷达进行连续立体监测。

新实施的环境空气质量指数将空气质量划分成优、良、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染共 6 个等级。对研究期间每小时的空气质量指数进行

统计分析, 所用共 728 条数据(丢失 16 条数据)。优、良、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染天气所占数据条数分别为 123、121、87、60、165 和 172。其中, 33.5% 的时间为清洁天气(优、良天气), 而 66.5% 的时间内出现不同程度的天气污染, 其中重度污染和严重污染所占比例最大, 分别为 22.7%、23.6%。

激光雷达回波信号的时空分布与空气质量指数变化趋势如图 1 所示, 激光雷达接收到的返回信号是每微秒光子数, 得到最终的回波信号需经过光电转化、背景信号扣除、几何因子校正、距离平方校正及信号平滑滤波等一系列的预处理工作, 其中 LST 表示当地标准时间。修正后的回波信号以不同颜色显示, 反映大气中颗粒物在垂直方向上的分布状况, 数值越大表明颗粒物含量越多。从观测结果来看, 污染物主要集中累积在 300 m 以下, 在高空并未观测到漂浮的颗粒物或输送过来的颗粒物污染源。第一次红色预警(12月8日7时至12月10日12时), 污染物迅速清除; 而第二次红色预警(12月19日7时至12月22日24时), 污染物清除缓慢, 持续时间长。

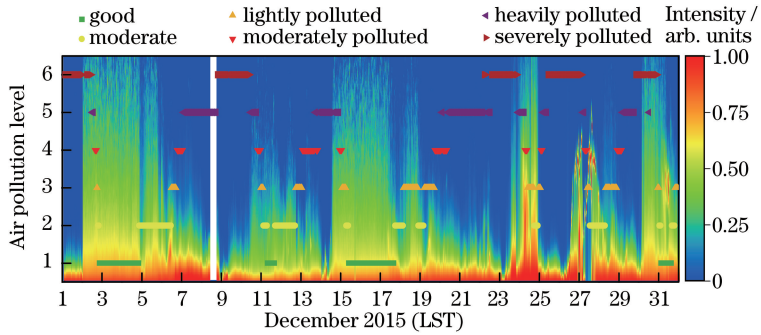


图 1 激光雷达回波信号的时空分布和空气质量指数变化趋势

Fig. 1 Spatial and temporal distribution of the echo signal monitored by lidar and variation trend of air pollution index

3.2 ABLH 特征分析

3.2.1 ABLH 演变特征

图 2 为激光雷达和 WRF 模式给出的 ABLH 演变特征。从对比结果可以看出, 两者结果趋于一致。WRF 模拟与激光雷达反演结果的相关性为 0.70, 均方根误差为 433 m, 平均偏差为 -264 m。清洁天气情况下 ABLH 较高, 最高可到 1000 m 左右, 而污染期间 ABLH 低, 最低可能不足 100 m。两者的极值并没有很好地吻合。

12 月份共有两个较长的无污染时间段, 第一个阶段为 2 日 19 时至 6 日 11 时, 共持续 89 h, 激光雷达反演的平均 ABLH 为 637 m(220~968 m), 而 WRF 模拟的平均 ABLH 为 583 m(27~1675 m),

相对于激光雷达反演, WRF 模拟的平均高度误差为 8.5%。第二个阶段为 15 日 10 时至 17 日 16 时, 共持续 55 h, 激光雷达反演的平均 ABLH 为 660 m(448~880 m), 而 WRF 模拟的平均 ABLH 为 548 m(55~1182 m), 平均高度误差为 17.0%。

此外, 12 月份更多的是污染时间段, 第一次红色预警前后污染过程(6 日 12 时至 11 日 02 时)共持续 111 h, 激光雷达反演的平均 ABLH 为 287 m(140~488 m), 而 WRF 模拟的平均 ABLH 为 146 m(27~489 m), 平均高度误差为 49.1%。第二次红色预警前后污染过程(18 日 04 时至 24 日 17 时)共持续 158 h, 激光雷达反演的平均 ABLH 为 370 m(136~850 m), 而 WRF 模拟的平均 ABLH

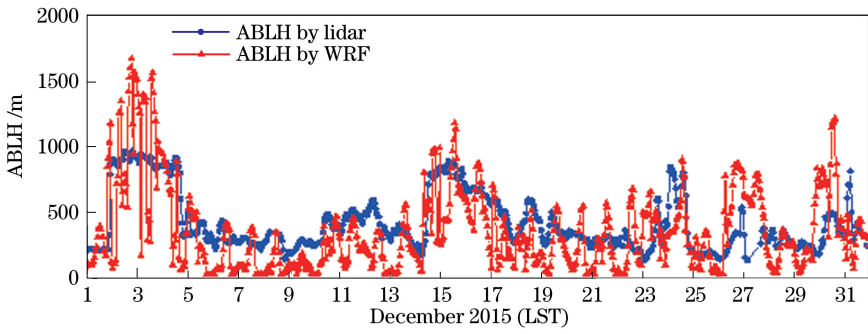


图 2 激光雷达反演与 WRF 模拟的 ABLH 结果对比

Fig. 2 Comparison of ABLH results between lidar inversion and WRF simulation

为 277 m(27~902 m),平均高度误差为 25.1%。

3.2.2 ABLH 日变化

图 3 为激光雷达和 WRF 模式给出的 ABLH 日变化特征曲线图。整体上,与雷达反演结果相比,WRF 模拟的相关性为 0.76,均方根误差为 163 m,平均偏差为 -61 m。因为 WRF 模拟的夜间 ABLH 相对较低,大多情况下高度都不到 100 m,而相同时刻激光雷达反演的结果为 300 m 左右,从激光雷达观测结果来看,污染物主要累积在近地面 300 m 左右的大气层,因此根据质量浓度梯度求解 ABLH 的方法更加符合实际的边界层变化规律。

3.2.3 ABLH 平均日变化

图 4 为 ABLH 平均日变化结果,整体上,与雷达

反演结果相比,WRF 模拟的相关性为 0.77,均方根误差为 94 m,平均偏差为 -69 m。WRF 模拟的 ABLH 具有明显的日变化,凌晨至上午 10 时 ABLH 维持在 (283±38) m,随后 ABLH 逐渐上升,于下午 14 时达到最高值 569 m,随后 ABLH 逐渐降低,直到下午 18 时,边界层又趋于稳定。激光雷达观测到的 ABLH 不存在明显的日变化,ABLH 从凌晨的 382 m 缓慢上升,同样在下午 14 时达到最高值 486 m,随后又缓慢降低,在晚上 21 时达到最小值 374 m。

3.3 ABLH 与颗粒物质量浓度之间的关系

图 5 为激光雷达反演 ABLH 与 PM_{2.5} 质量浓度的随时间变化的曲线图。可以看出,PM_{2.5} 质量浓度与 ABLH 相关性达到 -0.85,表明 PM_{2.5} 质量

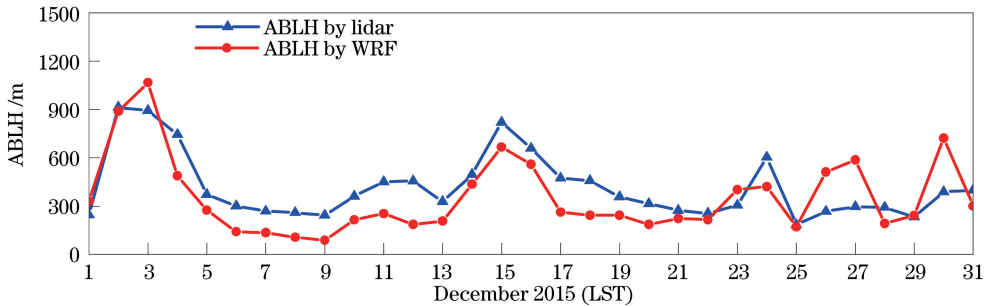


图 3 ABLH 日变化

Fig. 3 Daily variation of ABLH

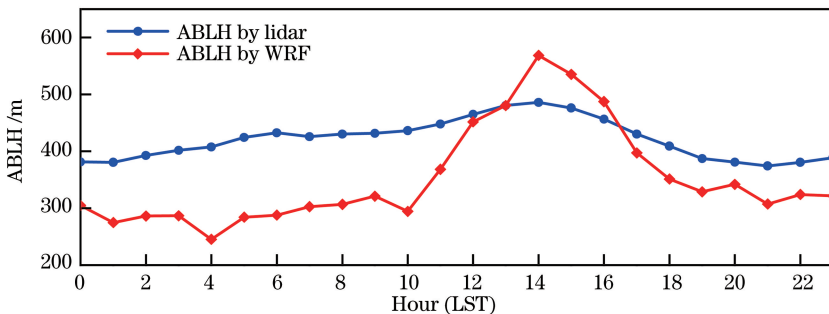


图 4 ABLH 平均日变化

Fig. 4 Daily average variation of ABLH

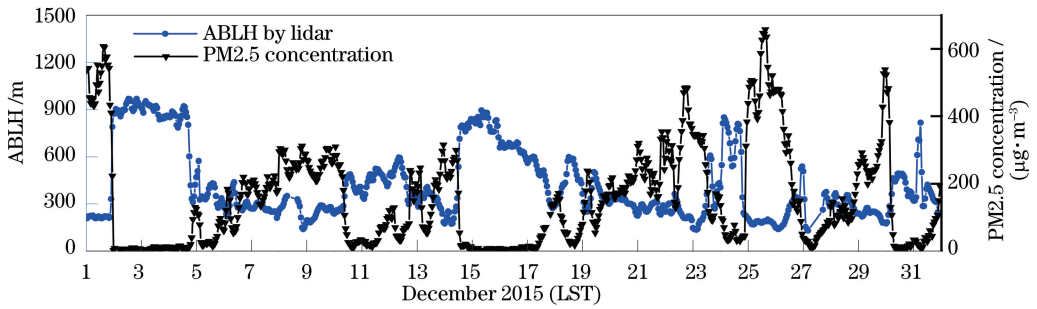


图 5 激光雷达反演 ABLH 与 PM2.5 质量浓度变化

Fig. 5 Variation of ABLH by lidar inversion and PM2.5 mass concentration

浓度与 ABLH 存在很强的负相关性。如 5 日 ABLH 从 881 m 迅速下降到 350 m 左右,导致颗粒物质量浓度迅速升高,出现重污染天气。12 月份连续出现多次重污染的原因除了北京独特的地理环境位置之外,根据国家气候中心的分析,12 月份平均风速不到 2 m/s,较常年偏小 5%,小风日数(风速小于 2 m/s)较常年同期偏多,风速低、小风日数多使污染物快速在近地面累积。其次,北京地区平均相对湿度约为 71%,较常年同期偏高 36%^[30],颗粒物的吸湿性增长使相对湿度大的天气情况下也会出现污染物质量浓度增加的情况。

4 结 论

利用激光雷达对 2015 年 12 月份重霾天气下的北京进行连续性探测,采用梯度法对数据进行反演获取 ABLH。同时,对 WRF 数值模式模拟的 ABLH 结果进行数据评估,发现虽然两种方法的结果具有较好的一致性,但是极值并没有很好地吻合。对于 WRF 模拟日变化结果来说,相关性达到 0.76,均方根误差为 163 m,平均偏差为 -61 m。同时发现在清洁天气下,WRF 模拟的准确性要高于污染天气下的模拟结果。

WRF 模式的误差来源主要包括:模拟采用的 USGS 地形资料与实际地形高度存在一定的差异,使得下垫面与真实情况存在差异;初始场数据虽然采用是经过同化的 FNL 再分析资料,但气象场具有一定的复杂度,不可能完全用模拟来替代实际的大气状况;同时模式中存在较多的假设条件,这些都会给 WRF 模拟带来一定的误差。此外,需要注意的是,WRF 模式中参数化方案不同对模拟结果具有较大的影响,不同参数化方案的性能分析也是下一步需要探讨的。

正是 WRF 模拟误差的存在,使得必须通过修正途径来提高 WRF 的模拟能力,而激光雷达具备

长期持续观测能力,通过严格数据质量控制,可以有效保证数据精度和准确度。相对于其他方法,激光雷达反演可以更加方便准确地得到 ABLH 的时间序列变化,因此,可以利用激光雷达反演的 ABLH 对 WRF 等数值模式模拟的 ABLH 进行诊断,通过调整模型参数化方案,可以在一定程度上提高数值模式模拟的准确性。

参 考 文 献

- [1] Jiang Y C, Zhao T L, Wang H, *et al.* Analysis on atmospheric boundary layer and regional transport during PM_{2.5} pollution episodes in Fuzhou[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(2): 347-355.
蒋永成, 赵天良, 王宏, 等. 福州市 PM_{2.5} 污染过程中大气边界层和区域传输研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(2): 347-355.
- [2] Asimakopoulos D N, Helmis C G, Michopoulos J. Evaluation of sodar methods for the determination of the atmospheric boundary layer mixing height[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2004, 85(1/2/3): 85-92.
- [3] Teng J Y, Qin K, Wang Y J, *et al.* Study on automatic identification of aerosols boundary layer height with local optimum model based on lidar data [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(2): 361-367.
滕继晓, 秦凯, 汪云甲, 等. 基于激光雷达观测的大气边界层自动识别局部最优点算法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(2): 361-367.
- [4] Zhang W C, Zhang Y, Lü Y, *et al.* Observation of atmospheric boundary layer height by ground-based LiDAR during haze days [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(4): 981-992.
张婉春, 张莹, 吕阳, 等. 利用激光雷达探测灰霾天气大气边界层高度[J]. *遥感学报*, 2013, 17(4): 981-992.
- [5] Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, *et al.* Characteristics of boundary layer height in Jing-Jin-Ji area based on

- lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 010101.
- 吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 基于激光雷达的京津冀地区大气边界层高度特征研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 010101.
- [6] Wang L, Xie C B, Han Y, *et al.* Comparison of retrieval methods of planetary boundary layer height from lidar data [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(4): 241-247.
- 王琳, 谢晨波, 韩永, 等. 测量大气边界层高度的激光雷达数据反演方法研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2012, 7(4): 241-247.
- [7] Chen J, Wang J J. Diurnal cycles of the boundary layer structure simulated by WRF in Beijing [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(4): 403-411.
- 陈炯, 王建捷. 北京地区夏季边界层结构日变化的高分辨模拟对比[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(4): 403-411.
- [8] Zhao S Q, Zhang L, Wang Z T, *et al.* Boundary layer height estimate in summer over the Lanzhou suburb in the Yuzhong area using lidar measurement and numerical model[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2012, 17(5): 523-531.
- 赵世强, 张镭, 王治厅, 等. 利用激光雷达结合数值模式估算兰州远郊榆中地区夏季边界层高度[J]. *气候与环境研究*, 2012, 17(5): 523-531.
- [9] He X H. The simulation of PM_{2.5} pollution in autumn over Beijing, Tianjin and Hebei region[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2015.
- 何心河. 2014年秋季京津冀地区PM_{2.5}污染过程的数值模拟研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2015.
- [10] Wang L X, Wang Y, Lai X L, *et al.* Study on the simulation of boundary layer height in Lanzhou in winter using WRF model with different boundary layer parameterization schemes [J]. *Plateau Meteorology*, 2017, 36(1): 162-172.
- 王丽霞, 王颖, 赖锡柳, 等. WRF模式不同边界层参数化方案模拟兰州冬季边界层高度的研究[J]. *高原气象*, 2017, 36(1): 162-172.
- [11] Zhu Y H. Environmental science hot spots in 2015 [J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34(1): 99-113.
- 祝叶华. 2015年环境科学热点回眸[J]. *科技导报*, 2016, 34(1): 99-113.
- [12] Lv L, Liu W Q, Zhang T S, *et al.* Observations of particle extinction, PM_{2.5} mass concentration profile and flux in north China based on mobile lidar technique [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 164: 360-369.
- [13] Chen Z Y, Zhang J S, Zhang T S, *et al.* Haze observations by simultaneous lidar and WPS in Beijing before and during APEC, 2014 [J]. *Science China Chemistry*, 2015, 58(9): 1385-1392.
- [14] Luo Y, He Y, Geng L M, *et al.* Long-distance laser ranging lidar based on photon counting technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0514001.
- 罗远, 贺岩, 耿立明, 等. 基于光子计数技术的远程测距激光雷达[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0514001.
- [15] Liu C, Fan G Q, Lv L H, *et al.* Observation of the boundary layer structure and aerosol properties over Yangtze River Zone using mobile shipboard lidar[C] // *Optics and Photonics for Energy and the Environment 2016*, November 14-17, 2016, Leipzig Germany. Washington: OSA, 2016: JW4A.28.
- [16] Wang Z, Cao X, Zhang L, *et al.* Lidar measurement of planetary boundary layer height and comparison with microwave profiling radiometer observation[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(8): 1965-1972.
- [17] Wang L, Xie C B, Wang Z Z, *et al.* Application of gradient method to detect height distribution of atmospheric boundary layer with lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(3): 161-167.
- 王琳, 谢晨波, 王珍珠, 等. 激光雷达探测大气边界层高度分布的梯度法应用研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2012, 7(3): 161-167.
- [18] Zhang W, Wu S H, Song X Q, *et al.* Atmospheric boundary layer detected by a Fraunhofer lidar over Qingdao suburb [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0628002.
- 张薇, 吴松华, 宋小全, 等. 夫琅禾费暗线激光雷达探测青岛市郊大气边界层[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0628002.
- [19] Bo G Y, Liu D, Wang B X, *et al.* Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(10): 1014002.
- 伯广宇, 刘东, 王邦新, 等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1014002.
- [20] Xiang Y, Ye Q H, Liu J G, *et al.* Retrieve of planetary boundary layer height based on image edge detection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0704003.
- 项衍, 叶擎昊, 刘建国, 等. 基于图像边缘检测法反演大气边界层高度[J]. *中国激光*, 2016, 43(7):

- 0704003.
- [21] Li X, Quan J N, Wang F, *et al.* Evaluation of the method for planetary boundary layer height retrieval by lidar and its application in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(2): 435-446.
李霞, 权建农, 王飞, 等. 激光雷达反演边界层高度方法评估及其在北京的应用 [J]. 大气科学, 2018, 42(2): 435-446.
- [22] Pang Y, Han Z W, Zhu B, *et al.* A model study on distribution and evolution of atmospheric pollutants over Beijing-Tianjin-Hebei region in summertime with WRF-Chem [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2013, 36(6): 674-682.
庞杨, 韩志伟, 朱彬, 等. 利用 WRF-chem 模拟研究京津冀地区夏季大气污染物的分布和演变 [J]. 大气科学学报, 2013, 36(6): 674-682.
- [23] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1983, 22(6): 1065-1092.
- [24] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, *et al.* Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated k model for the longwave [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D14): 16663-16682.
- [25] Ek M B. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D22): 8851.
- [26] Hong S Y. A new stable boundary-layer mixing scheme and its impact on the simulated East Asian summer monsoon [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 136(651): 1481-1496.
- [27] Grell G A, Dévényi D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques [J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(14): 38-1-38-4.
- [28] Bi X Y, Liu F, Wu D. Comparison of some limit for stability classification [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2005, 21(4): 402-409.
毕雪岩, 刘烽, 吴兑. 几种大气稳定度分类标准计算方法的比较分析 [J]. 热带气象学报, 2005, 21(4): 402-409.
- [29] Seibert P, Beyrich F, Gryning S E, *et al.* Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(7): 1001-1027.
- [30] Chai F H. China issued red alert on heavy air pollution for the first time [J]. World Environment, 2016(1): 25-26.
柴发合. 空气重污染红色预警首次启动 [J]. 世界环境, 2016(1): 25-26.